

[2082] 高一様伸び鋼棒と横拘束併用による高強度PCくいの曲げ靱性改善

正会員 ○ 西山 峰広 (京都大学工学部)
 正会員 六車 熙 (京都大学工学部)
 正会員 渡辺 史夫 (京都大学工学部)

1. まえがき

著者らは過去に高強度PCくいに横拘束コンクリートを使用し、その曲げ靱性を改善する研究を実施してきたが[1、2]、これらの研究においては、横拘束コンクリートの能力が十分に発揮される前にPC鋼棒の破断により崩壊に至った。また、この時供試体中でのPC鋼棒破断時伸びひずみは、鋼材の一様伸びにはほぼ一致することが明かとなった。そこで、曲げ靱性をさらに向上させるには、一様伸びの大きな鋼材の使用が不可欠であると認識し、高一様伸び鋼材を開発、これを横拘束コンクリートと併用することにより、PC梁の曲げ靱性をさらに飛躍的に改善できることを、明かにした[3]。本研究では、これを高強度PCくいに応用し、単純支持された横拘束を行った高一様伸びPC鋼棒使用高強度PCくいと慣用PC鋼棒使用高強度PCくいに対する片振り漸増曲げ載荷試験を行い、慣用PC鋼棒使用時と比較して、高一様伸びPC鋼棒使用時には、PC梁に対する実験結果と同様に、PCくいの曲げ靱性が著しく改善されることを確認しようとするものである。

2. 実験概要

2.1 供試くい

供試くいには図1に示す全長5mのD400mmC種高強度PCくい13本を使用した。表1には、これら供試くいの仕様詳細一覧を示す。表1中、EX501-EX701、EX5A1-EX7B1は何れも公称降伏点強度100kgf/mm²の横拘束筋をくい外周より1cm内側に配置した横拘束くいであり、その他の2本のくいは無拘束くいである。横拘束筋の直径はφ5mm、φ6mmおよびφ7mmの計3種類であり、また、PC鋼棒には、慣用PC鋼棒1種類、高一様伸びPC鋼棒2種類(AおよびB、AとBではロットが異なる。)、計3種類の16-D9.2mmD種異形PC鋼棒を使用した。各供試くいの名は次に示す規則に従ってつけられた。

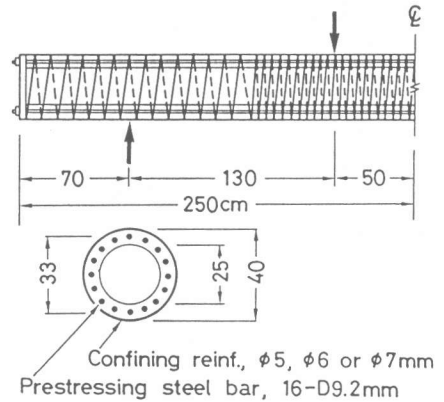


図1 供試くいおよび載荷状態

例 EX 5 0 1

┌──┬───┐
 │ ├── 供試くい番号
 │ └── PC鋼棒の種類
 │ (0 : 慣用、A : 高一様伸びA、B : 高一様伸びB、AB : AB混用)
 └──┬───┘
 │ ├── 横拘束筋直径

コンクリートの機械的性質を表2に、また、PC鋼棒の機械的性質を表3にそれぞれ示す。さらに、PC鋼棒の応力-ひずみ曲線を図2に示す。表2および図2より、PC鋼材A、Bの-様伸びは、慣用品と比べてかなり大きくなっていることがわかる。なお、コンクリートの機械的性質はφ20×30cm、肉厚4cmの中空シリンダーより得られた値である。但し、中空シリンダー試験では応力ピーク時近傍で爆発的な破壊となるため、応力ピーク時のひずみを特定することはできなかった。このため、応力ピーク時ひずみと圧縮限界ひずみは、コンクリートの圧壊によって破壊に至った無拘束くい2体の圧縮側カバーコンクリート剝離時とくい破壊時のコンクリート圧縮縁ひずみの平均値をそれぞれ無拘束コ

表1 供試くい仕様詳細一覧

供試くい名	使用PC鋼棒 種別	横拘束筋 径(mm)*1	横拘束係数 Cc(x10 ⁻⁴)*2	コンクリートの性質 #2	
				fc'(kgf/cm ²)	e cu(%)
001 0A8	慣用品○ 高一様伸びAB	-	0 0	948 948	0.302 0.302
EX501 EX502 EX503 EX601 EX701	慣用品 ○	φ5 φ6 φ7	4.125 5.952 8.122	1007 1033 1063	0.981 1.281 1.638
EX5A1 EX6A1 EX7A1	高一様 伸び A	φ5 φ6 φ7	4.125 5.952 8.122	1007 1033 1063	0.981 1.281 1.638
EX5B1 EX6B1 EX7B1	高一様 伸び B	φ5 φ6 φ7	4.125 5.952 8.122	1007 1033 1063	0.981 1.281 1.638

*1 横拘束筋降伏応力 $f_y=100\text{kgf/mm}^2$ 横拘束筋ピッチ $s=5\text{cm}$
 *2 C_c, f_c', e_{cu} は以下に示す式により計算した。

$$C_c = \rho_s \frac{\sqrt{f_y}}{f_c'} \left(1 - 0.5 \frac{s}{D}\right) \quad ; \text{中実円筒断面として計算}$$

$$f_c' = (1 + 150 C_c) f_c'$$

$$e_{cu} = (1 + 5450 C_c) e_{cu}$$

f_c' : 無拘束コンクリートの圧縮強度
 e_{cu} : 無拘束コンクリートの圧縮限界歪
 ρ_s : 横拘束筋とコアコンクリートの体積比

表2 コンクリートの機械的性質

圧縮強度	948	kgf/cm ²
初期弾性係数	4.01×10^5	kgf/cm ²
最大応力時歪*	0.275	%
圧縮限界歪*	0.302	%

*くい供試体曲げ試験より得られた値

表3 PC鋼棒の機械的性質

PC鋼棒種別	A	B	○
降伏点強度(kgf/mm ²)*1	130	127	136
引張強度(kgf/mm ²)	157	153	150
ヤング係数(kgf/mm ²)	2.18×10^6	2.15×10^6	2.03×10^6
破断伸び(%)	6.48	7.58	9.08
一様伸び(%)#2	5.13	4.73	2.00
降伏時伸び(%)#2	0.80	0.79	0.85

*1 0.2%off-setによって定義された値
 *2 多数標点法(6L50mm)による値

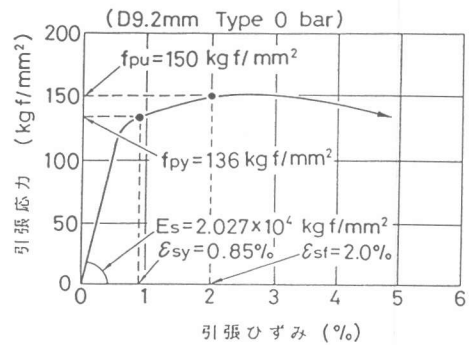


図2(a) PC鋼棒(Type0)の応力-ひずみ曲線

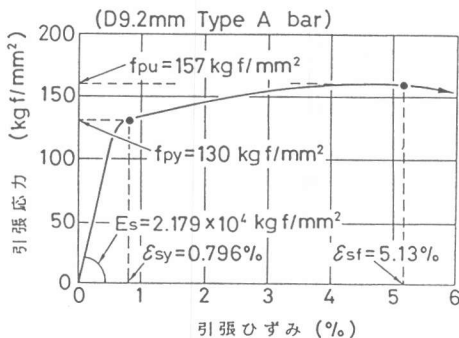


図2(b) PC鋼棒(TypeA)の応力-ひずみ曲線

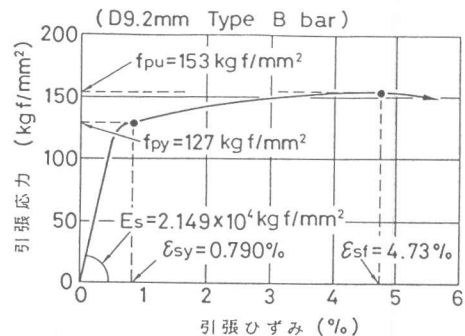


図2(c) PC鋼棒(TypeB)の応力-ひずみ曲線

ンクリートの応力ピーク時ひずみ、圧縮限界ひずみとした。また、表1中に示す拘束コンクリート使用くいの圧縮強度と圧縮限界ひずみは、著者らの提案による拘束コンクリートの圧縮限界ひずみ及び圧縮強度算定式 [4]を修正した式 (表1下に示す)より得られた値である。

2. 2 荷重方法および測定

荷重は図1に示すように、支点間距離360cm、中央曲げスパン100cmの3分点荷重とした。PC鋼材伸びひずみが、0.85%となる時点をPC鋼材降伏時と定義し、この時の中央たわみ δy を基準とし、 $n\delta y$ ($n=1, 2, 3, \dots$)でそれぞれ1回ずつ繰り返すというたわみ制御による片振り繰り返し荷重とした。荷重中は、中央たわみおよび曲げスパン内上下縁ひずみ(検長70cm)を電気式変位変換器により測定した。上下縁ひずみより平面保持を仮定して曲げスパン内曲率と引張側最外端PC鋼材ひずみを算定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 曲げモーメント-中央たわみ関係

各くいの代表的な曲げモーメント-中央たわみ関係を図3に示す。横拘束を施したくいは、無拘束くいと比べて大きな塑性変形を示している。しかし、横拘束を施しただけでは早い時期の慣用PC鋼棒の破断によりくいが崩壊に至り、横拘束コンクリートの性能を十分発揮することができない。高-様伸びPC鋼棒の使用により、初めて横拘束コンクリートの大きな塑性変形能力を引き出すことができ、くいの曲げ靱性を著しく改善できることが実験結果より如実に示されている。

表4に、曲げひびわれ時、PC鋼材降伏時および曲げ破壊時のモーメントの実測値を示す。曲げひびわれ時および曲げ降伏時のモーメントの値について、横拘束の有無、

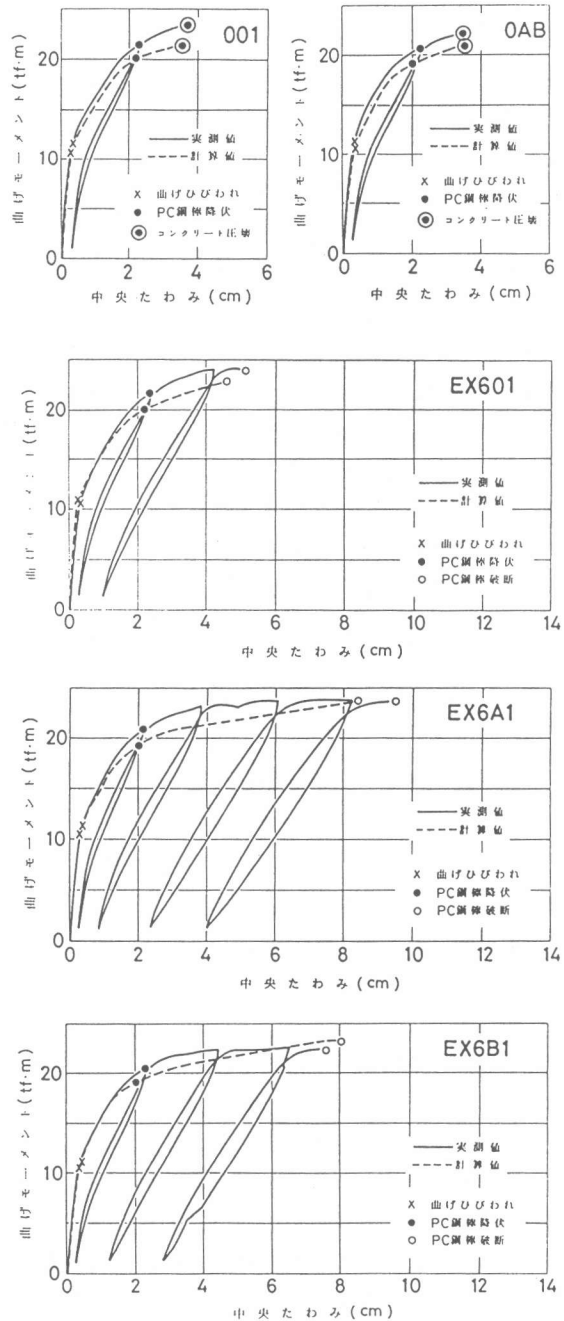


図3 曲げモーメント-中央たわみ曲線の一例

PC鋼棒の種別による差異は、認められなかった。また、曲げ破壊モーメントの大きさについても、供試くいの種別には関係なく、ほぼ同一の値となっている。また、これらの計測値は（）内に示す計算値ともよく一致する。

繰り返し載荷による耐力低下などの影響は、くいが破壊に至るまでほとんど観測されず、良好な履歴復元力特性を示している。

3. 2 曲げ破壊のモード

無拘束くいではPC鋼材降伏後に生じる圧縮側コンクリートの圧壊により曲げ破壊に至り、横拘束くいでは十分な横拘束が施されているため、全てのくいが引張側PC鋼棒の破断により破壊に至った。したがって、横拘束筋の径による差は見られなかった。

3. 3 曲げモーメント-曲率関係

図4に、各くいの代表的な曲げモーメント-曲げスパン内曲率関係実測結果を示す。中央たわみの場合と同様に、横拘束と高伸びPC鋼材を併用することにより、著しく曲げ靱性が改善されていることがわかる。

3. 4 中央たわみ靱性率および曲率靱性率

本研究では、無拘束くいの変形能力を基準とした時の、横拘束くいの

変形能力を曲げ靱性を評価する指標として用いた。すなわち、無拘束くい破壊時の中央たわみおよび曲率の値に対する横拘束くい破壊時のそれらの値の比をそれぞれたわみ靱性率および曲率靱性率と定義し、表5に示した。言いかえるならば、これらの値は、従来のくい（無拘束、慣用PC鋼棒使用）と比較して、横拘束くい破壊時のたわみや曲率がどの程度改善されたかを示す値である。表より明らかなように、PCくいの曲げ靱性を改善するには横拘束のみでは不十分であり、高一様伸びPC鋼棒の使用が不可欠であることがわかる。

3. 5 くい曲げ破壊時コンクリート圧縮縁ひずみ

無拘束くい（圧縮域コンクリートの圧壊により破壊）の破壊時圧縮縁ひずみは、0.302%であった。EX501- EX701は、PC鋼棒の破断により破壊に至ったが圧縮縁ひずみは、0.363

表4 実験結果一覧

供試くい	PC鋼材種別	曲げひびわれモーメント Mcr (tonxm)	PC鋼材降伏時モーメント My (tonxm)	曲げ破壊モーメント Mu(tonxm)	破壊モード*1
001	○	11.12 (10.67)	21.52 (19.98)	23.63 (21.73)	C (C)
0AB	AB	10.92 (10.72)	20.70 (19.14)	22.20 (21.04)	C (C)
EX501	○	10.40	22.23	23.40	T
EX502		9.23	21.48	22.20	T
EX503		10.14	21.87	22.91	T
EX601		10.56	21.74	23.50	T
EX701		11.67 (10.67)	21.65 (19.98)	22.82 (22.80)	T (T)
EX5A1	A	11.08	21.13	23.27	T
EX6A1		11.34	20.93	23.50	T
EX7A1		10.95 (10.72)	21.61 (19.31)	24.05 (23.74)	T (T)
EX5B1	B	11.12	20.77	22.72	T
EX6B1		10.89	20.54	22.30	T
EX7B1		11.02 (10.71)	21.13 (18.91)	23.47 (23.15)	T (T)

*1 破壊モード C:コンクリートの圧壊による T:PC鋼材の破断による
()内は計算値

表5 たわみ靱性率および曲率靱性率

供試くい	PC鋼材種別	終局時中央たわみ(cm)	たわみ靱性率	終局時曲率 φu(x10 ⁻⁴ /cm)	曲率靱性率
001	○	3.730	1.015	3.363	1.022
0AB	AB	3.621	0.985	3.216	0.978
平均値		3.676	1.000	3.290	1.000
EX501	○	5.084	1.383	5.082	1.545
EX502		4.720	1.284	5.604	1.703
EX503		4.935	1.342	5.364	1.630
EX601		5.092	1.385	5.392	1.639
EX701		4.541	1.235	4.907	1.491
平均値		4.874	1.326	5.270	1.602
EX5A1	A	9.838	2.676	15.986 *	4.857
EX6A1		9.574	2.604	14.740 *	4.480
EX7A1		12.731	3.463	15.704	4.773
平均値		10.714	2.915	15.475	4.704
EX5B1	B	12.714	3.459	15.449	4.696
EX6B1		7.714	2.098	11.792 *	3.584
EX7B1		11.184	3.042	20.676 *	6.284
平均値		10.537	2.866	15.972	4.855

* (注)参照

%であった。横拘束コンクリートと高一様伸びPC鋼棒を併用したEX5A1-EX7A1、EX5B1-EX7B1では、コンクリート圧縮縁ひずみが、1.026% - 1.712%で、PC鋼棒が破断した。この時、カバーコンクリートが剝離している程度でコンクリートには大きな損傷はなかった。

3.6 くい曲げ破壊時PC鋼棒伸びひずみ

表6は、くい破壊時PC鋼棒伸びひずみ実測値を示す。無横拘束くいにおける表中の値は、曲げ破壊がコンクリートの圧縮破壊によって起こっているため、コンクリート圧縮破壊時のPC鋼棒伸びひずみである。PC鋼棒破断伸びは、慣用PC鋼棒では、平均値で1.841%であり、高一様伸びPC鋼棒Aでは、4.621%、同Bでは、4.819%であった。これらの値は、何れも当該PC鋼棒の応力-ひずみ曲線における一様伸びとほぼ一致している。したがって、實際上仕様可能なPC鋼棒伸びひずみは、ここで言う一様伸びであり、破断伸びは構造物中でのPC鋼棒の限界状態を示す数値としては、不適切である。また、PC鋼棒破断による破壊は大きな耐力の低下をとめない、破壊のモードとしては避けるべきであろう。したがって、実際の設計を行う上では、破壊のモードがコンクリートの圧壊となるように横拘束筋量を制限すべきである。

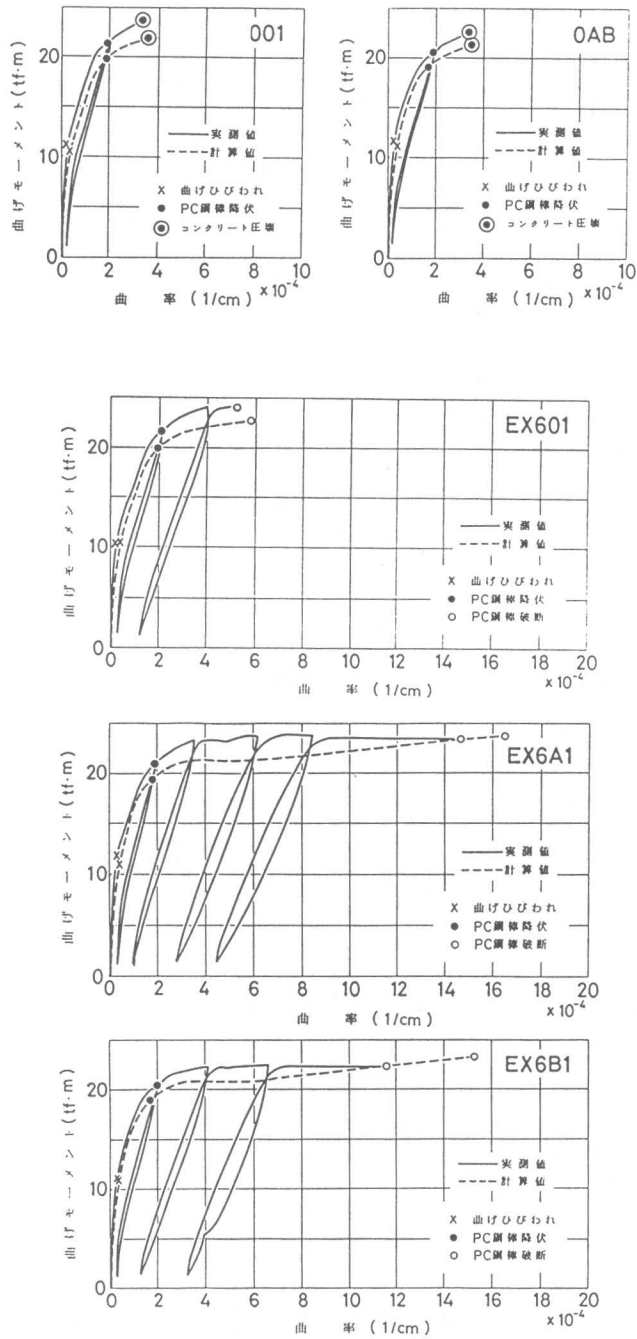


図4 曲げモーメント-曲率曲線の一例

4. むすび

コンクリートの横拘束により高強度PCくい
の曲げ変形能力を改善できることが、本研
究によって再度確認された。しかしながら、
現在慣用のPC鋼棒の一樣伸びは2%程度で
あり、これを使用した現行PCくいに横拘束
を行った場合には、PC鋼棒の破断が早期に
おこってくいが曲げ破壊に至るため、横拘束
コンクリートの曲げ靱性改善能力を十分発揮
させることができない。横拘束コンクリート
の能力を十分引き出すためには、一樣伸びの
大きなPC鋼棒を用いることが必要であり、
本研究では、一樣伸び5%以上の高一様伸び
PC鋼棒を用いて、くいの曲げ靱性を著しく
改善できることを示した。このような曲げ靱
性の著しい改善は、曲げ靱性を制御するとい
う靱性設計への道を開くものである。

表6 PC鋼棒伸びひずみ

供試くい	PC鋼材 種別	終局時PC鋼棒 伸び歪(%)	使用PC鋼棒 一樣伸び(%)	使用PC鋼棒 破断伸び(%)
001 04B	○ AB	1.273 *1 1.248 *1	2.00 4.93	9.08 7.03
平均値		1.261		
EX501 EX502 EX503 EX601 EX701	○	1.862 1.900 1.831 1.881 1.729		
平均値		1.841	2.00	9.08
EX5A1 EX6A1 EX7A1	A	4.621 *2 4.556 *2 4.685		
平均値		4.621	5.13	6.48
EX5B1 EX6B1 EX7B1	B	4.551 3.649 *2 6.256 *2		
平均値		4.819	4.73	7.58

*1 PC鋼棒は破断しなかったため、コンクリート圧壊による
終局時の値を示す。

*2 (注)参照

(注) 表3中*のついた値は、塑性ヒンジ長さを $l_p=30.47\text{cm}$ として計算した値である。慣
用PC鋼棒使用時には、曲げスパン内での変形は曲げスパン全域にわたってほぼ一樣となってい
るのに対して、高一様伸びPC鋼棒使用時には、変形が曲げスパンの塑性ヒンジ領域に集中して
おり、これを考慮しないとコンクリートとPC鋼棒のひずみを実際よりも小さく見積ってしまう
ことになる。そこで、慣用PC鋼棒使用くいを基準にして塑性ヒンジが形成されていると考えら
れる供試くい EX5A1、EX6A1、EX6B1、EX7B1 の塑性ヒンジ長さ l_p を求めると、平均 30.47cm とな
り、この値を用いて計測値を修正し、各供試くいの塑性ヒンジ内での諸値として示した。

(参考文献)

- [1] 六車、渡辺、幅、浅井:超高強度PCくいの曲げ靱性改善、第7回コンクリート工学年次
講演会論文集、pp.465-468、昭60.5.
- [2] Muguruma, H., Nishiyama, M. and Watanabe, F.: Improving the Flexural
Ductility of Ultra-High Strength Pre-stressed Spun Concrete Piles by using
High Yield Strength Confining Reinforcement, Proc. of the 10th FIP
Congress (New Delhi, India), Vol.1, pp.299-306, Feb. 1986.
- [3] 六車、渡辺、西山:高一様伸びPC鋼材のPC梁曲げ靱性改善に及ぼす効果、日本建築学会
近畿支部研究報告集、pp.33-36、昭61.5.
- [4] 六車他3名:横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化、セメント技術年報、34巻、
pp.429-432、昭55.5.